

Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении

В.П. Кольцов, Ле Чи Винь, Д.А. Стародубцева✉, Нгуен Минь Хоанг

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉starodybseva@ex.istu.edu

Резюме

Одной из эффективных финишных операций является дробеударная обработка, при которой под действием ударов дроби обрабатываемую поверхность детали происходит поверхностное пластическое деформирование, обеспечивающее заданные характеристики материала деталей. В авиастроении панели и обшивки крыла самолета, работающие в условиях циклических нагрузений, для повышения сопротивления их усталости после процесса формообразования и зачистки лепестковым кругом подвергаются дробеударному упрочнению. Контрольными параметрами процесса дробеударного упрочнения являются шероховатость поверхности, микротвердость, величина упрочненного слоя, остаточные напряжения и т.д. Однако, если шероховатость поверхности и микротвердость несложно определяются традиционными методами, то определение величины упрочненного слоя и остаточных напряжений – более трудоемкая задача. В последнее время с развитием информационных технологий все чаще применяются различные программы инженерного анализа для изучения сложных технологических процессов, включая и дробеударную обработку. В представленной работе проведено исследование формирования упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое, вызванных операцией дробеударного упрочнения детали из алюминиевого сплава с использованием программы инженерного анализа методом конечных элементов. По результатам исследования представлены наглядные данные по напряженно-деформированному состоянию поверхностного слоя после соударения дроби с обрабатываемой поверхностью; приведены графические распределения остаточных напряжений по глубине в поверхностном слое и зависимости значений максимальных остаточных напряжений от диаметра и скорости удара дроби; разработаны рекомендации по выбору условий и режимов при дробеударном упрочнении, а также математические модели для определения величины упрочненного слоя и максимальных остаточных напряжений в поверхностном слое детали.

Ключевые слова

дробеударное упрочнение, упрочненный слой, остаточные напряжения, моделирование, качество поверхностного слоя

Для цитирования

Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении / В.П. Кольцов, Ле Чи Винь, Д.А. Стародубцева, Нгуен Минь Хоанг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 50–58. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 29.09.2022 г.; принята к публикации: 29.09.2022 г.

Modelling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening

V.P. Kol'tsov, Le Chi Vinh, D.A. Starodubtseva✉, Nguyen Minh Hoang

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉starodybseva@ex.istu.edu

Abstract

One of the effective finishing operations is shot-impact blasting in which, under the impact influence of the shot on the surface of the workpiece, surface plastic deformation occurs, providing the specified characteristics of the material of the parts. In the aircraft industry to increase the fatigue resistance of aircraft panels and wing skins operating under cyclic loads, after the process of their shaping and grinding with a flap wheel, such parts are subjected to shot-impact hardening. The control parameters of the shot-impact hardening process are surface roughness, microhardness, the size of the hardened layer, residual stresses, etc. At the same time, while the surface roughness and microhardness are not difficult to determine by traditional methods determining the size of the hardened layer and residual stresses is a more complex and time-consuming task. Recently, with the development of information technology, various engineering analysis programs have been increasingly used to study various complex technological processes, including shot-impact processing. In the present paper, a study of the formation of a hardened layer and residual stresses in the surface layer caused by the operation of shot-impact hardening of an aluminum alloy part using an engineering analysis program by the finite element method is carried out. According to the results of the study, visual pictures of the stress-strain state of the surface layer after the impact of the shot with the treated surface are presented, graphical distributions of residual stresses along the depth in the surface layer and the dependence of the values of maximum residual stresses on the diameter and velocity of the shot impact are presented, recommendations on the choice of conditions

and modes for shot-impact hardening are developed, as well as mathematical models for determining the value of the hardened layer and the maximum residual stresses in the surface layer of the part.

Keywords

shot-impact hardening, hardened layer, residual stresses, modeling, surface layer quality

For citation

Koltsov V.P., Le Chi Vinh, Starodubtseva D.A., Nguyen Minh Hoang. Modelirovanie formirovaniya osnovnykh pokazatelei kachestva poverkhnostnogo sloya detalei pri drobepudarnom uprochnenii [Modeling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 50–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.

Article info

Received: September 27, 2022; Revised: September 29, 2022; Accepted: September 29, 2022.

Введение

Одной из эффективных финишных операций является дробеударная обработка, при которой под действием ударов дроби об обрабатываемую поверхность детали происходит поверхностное пластическое деформирование, обеспечивающее заданные характеристики материала деталей. В авиастроении панели и обшивки крыла самолета, работающие в условиях циклических нагрузений, для повышения сопротивления их усталости после процесса формообразования и зачистки лепестковым кругом подвергаются дробеударному упрочнению [1–5].

Оценка величины упрочненного поверхностного слоя и сжимающих остаточных напряжений представляет наиболее трудоемкую и непростую задачу [6–16]. Для получения необходимых значений величин упрочненного слоя и остаточных напряжений детали конкретного материала необходимо назначить рациональные режимы упрочнения. В настоящее время применяются различные методики назначения режимов упрочнения, однако такие методики разработаны на основе результатов дорогостоящих и трудоемких экспериментов [17–22]. При этом зачастую эксперименты все еще проводятся при статических условиях, что не позволяет получить реальную картину процесса упрочнения, которую сложно использовать для прогнозирования результатов обработки в практических целях.

Постановка задачи

Представленная работа посвящена исследованию формирования величины упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое при дробеударном упрочнении детали из алюминиевого сплава с помощью программы инженерного анализа методом конечных элементов.

При анализе реального процесса дробеударного упрочнения [2] часть потока дроби, обладающая заданной скоростью, имеет нормальное направление движения к обрабатываемой поверхности, другая часть дроби попадает на поверхность под различными углами. Из-за отклонения части дроби от начального направления, часть кинетической энергии дроби приходится на трение, соударения с отскочившими дробинками, вследствие чего на обработанной поверхности образуются лунки с различными диаметрами и глубиной. Это приводит к неравномерности величины упрочненного слоя и распределения остаточных напряжений. Все перечисленное ухудшает качество обработанной поверхности.

Для исследования формирования величины упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое под отпечатками дроби в условиях и параметрах режимов дробеударной обработки, близких к реальным, была использована программа Ansys с модулем динамического анализа.

Результаты исследований многих авторов показали, что лучшее качество упрочненного слоя можно получить при обработке дробью со степенью покрытия отпечатками дроби на обработанной поверхности в пределах 90 % (соотношение площади поверхности детали, покрытой отпечатками дроби к общей исследуемой площади). Предварительные исследования показали [23], что для изучения процесса дробеударной обработки необходимо смоделировать единственный удар дроби об обрабатываемую поверхность детали. Повторный удар на сформировавшийся отпечаток дроби или удар последующих дробинок рядом с ранее сформировавшимся отпечатком незначительно влияет на значение величины упрочненного слоя и максимальных

значений остаточных напряжений, полученных от первого удара дроби.

Для моделирования единичного удара дроби приняты исходные данные, близкие к практическим условиям (табл.).

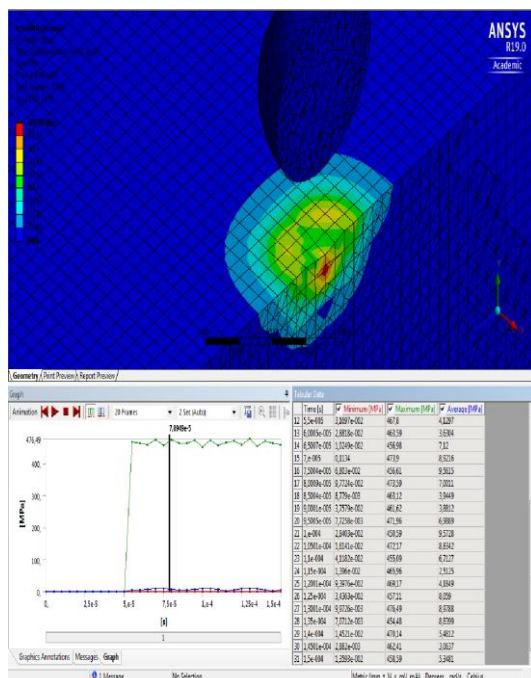
Конечно-элементная модель дробеударного упрочнения в виде модели единичного удара шара о поверхность пластины построена в среде модуля Explicit Dynamics программы инженерного анализа Ansys Workbench 19.0. При этом, такие параметры, как размер шара, начальная скорость полета шара, его материал, размер и материал пластины заданы согласно данным вышеуказанной таблицы. Для случаев удара шара о поверхность пластины под различным углом, в качестве нагрузки на модель шара прило-

жены две составляющие начальной скорости, включающие нормальную (перпендикулярно поверхности пластины со значением $V\cos\alpha$) и касательную (параллельно поверхности модели пластины – $V\sin\alpha$). Нижняя поверхность модели пластины зафиксирована. Генерация сетки конечных элементов модели шара и пластины – автоматическая.

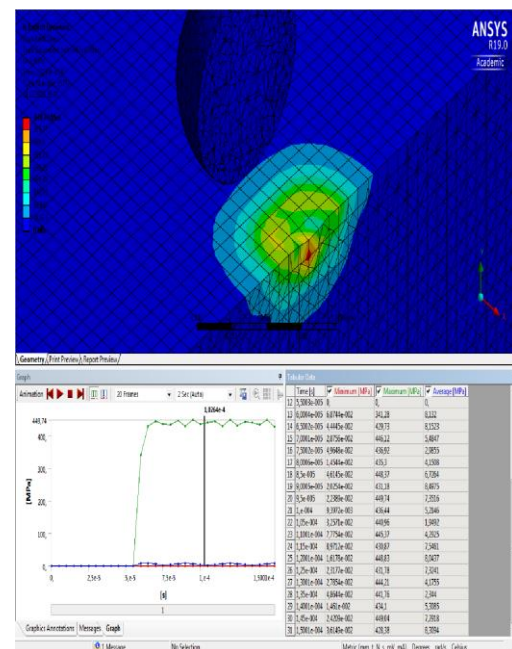
В качестве материала для модели пластины обрабатываемой детали назначен материал BT95, как наиболее широко используемый в авиационной промышленности, в частности для изготовления панелей крыла самолета. Размер модели шара назначен с учетом практического использования дроби на производстве, скорость удара – на

Исходные данные моделирования единичного удара дроби
Initial data for the simulation of a single shot impact

Показатель / Indicator	Параметры /Parameters
Материал дроби / Shot material	Абсолютный жесткий шарик / Absolute hard ball
Материал обрабатываемой детали / Material of the part	AL7075-T6 (аналог BT95 / analogue to BT95)
Диаметр дроби, мм / Shot diameter, mm	0,6; 1; 1,4; 1,8
Скорость удара дроби, м/с / Impact speed, m/sec	10; 15; 20; 25; 30
Угол соударения с поверхностью, α , град. / Surface impact angle, α , degrees	0; 10; 15; 20; 25; 30
Габаритный размер заготовки, мм / Workpiece overall dimension, mm	5×5×5



а



б

Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя после удара дроби:

а – угол удара дроби о поверхность – 0°; б – угол удара дроби о поверхность – 30°

Fig. 1. The stress-strain state of the surface layer after the impact with the shot:

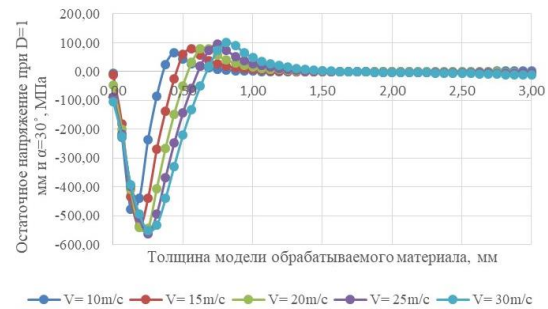
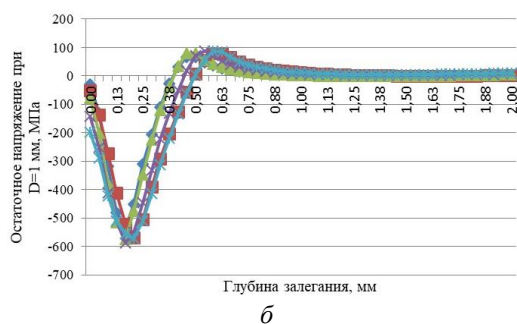
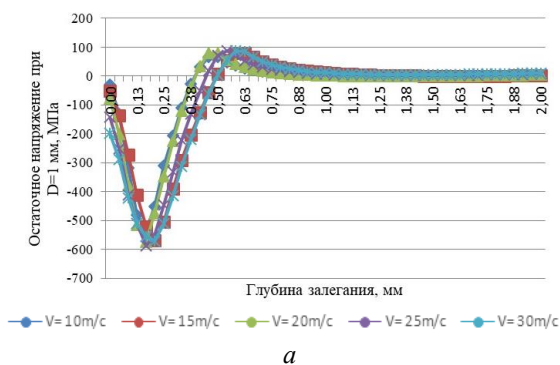
a – the angle of the shot impact on the surface – 0°; b – the angle of the shot impact on the surface – 30°

основании возможной окружной скорости дробеметного колеса дробеударной установки [3]. Размер заготовки подобран в соответствии с результатами предварительного моделирования, проводимого с целью получения достоверных результатов и максимально возможного сокращения времени анализа в программе Ansys [23].

На рис. 1 представлены результаты анализа типичных картин напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в поперечном сечении. Сечение проходит через центр шара и отпечатка в виде лунки, образованной в результате остаточной деформации на поверхности пластины после удара. Угол соударения шара с поверхностью (угол между вектором скорости и обрабатываемой поверхностью детали) составил 0 и 30°.

Анализ результатов исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя показал, что независимо от направления скорости, значений скорости и размера дроби напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала у отпечатка дроби имеет аналогичный характер.

На рис. 2 представлены типовые графики изменения нормальных остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка дроби при ударе дробью диаметром 1 мм под углом 0°, 15° и 30°.



в

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка дроби при ударе дробью диаметром 1 мм о поверхность под углом:

$a - 0^\circ$; $b - 15^\circ$; $в - 30^\circ$

Fig. 2. Distribution of residual stresses in the surface layer under the center of the shot imprint when a fraction with a diameter of 1 mm hits the surface at an angle of:

$a - 0^\circ$; $b - 15^\circ$; $c - 30^\circ$

Графики распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пластины в результате моделирования удара шара (см. рис. 2, $a - в$) показали высокую сходимость по форме и характеру с экспериментальными данными других исследователей [6–12].

По характеру кривых (см. рис. 2, $a - в$) видно, что независимо от скорости удара и направления удара дроби о поверхность детали распределение остаточных напряжений в поверхностном слое детали имеет аналогичную форму, но с некоторым сдвигом по толщине поверхностного слоя.

На рис. 3 представлены зависимости величин максимальных значений остаточных напряжений при ударе дроби в нормальном направлении к поверхности детали в зависимости от скорости удара и размера дроби. На рис. 4 показаны подробные зависимости величин максимальных значений остаточных напряжений при ударе дроби диаметром 1 мм о поверхность в зависимости от скорости и угла удара.

По характеру представленных на рис. 3 графиков видно, что для дроби (диаметр от 1,2 мм до 1,8 мм) независимо от скорости удара (в пределах от 10 до 30 м/с) при прямом ударе дроби о поверхность детали максимальное значение остаточных напряжений под дном отпечатка дроби меняется незначительно в отличие от дроби меньшего размера. По данным рис. 4 – при скорости удара дроби диаметром 1 мм

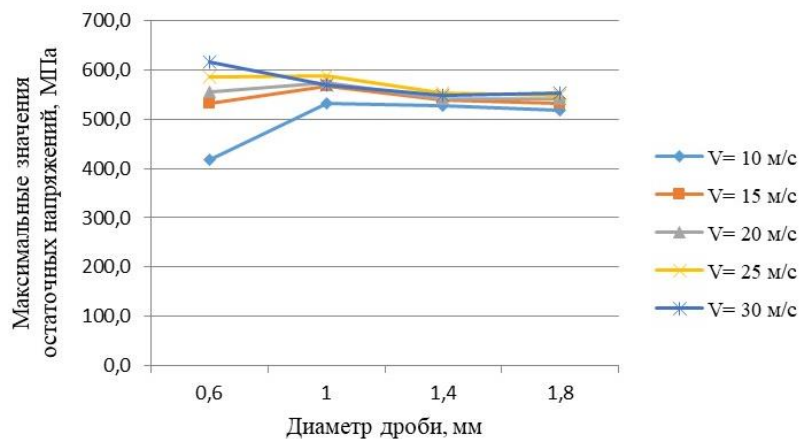


Рис. 3. Максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби при ударе дробью о поверхность под углом 0° в зависимости от диаметра дроби и различного значения скорости
Fig. 3. The maximum values of the residual stress under the center of the shot imprint when the fraction hits the surface at an angle of 0° , depending on the diameter of the fraction and the different value of the velocity

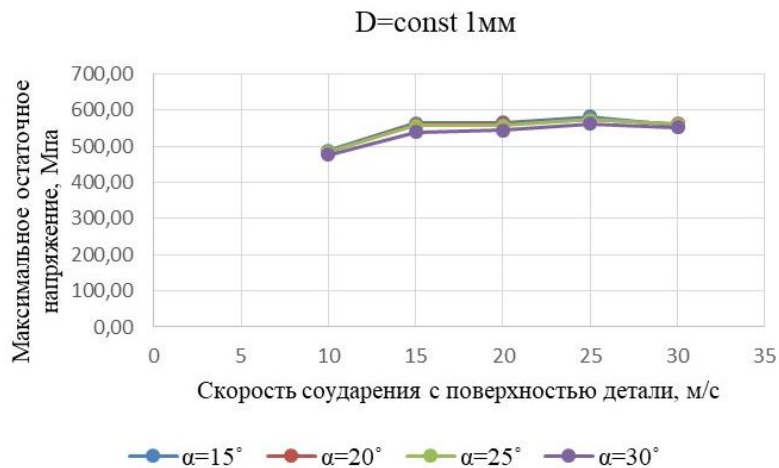


Рис. 4. Максимальное остаточное напряжение под центром отпечатка дроби в зависимости от угла соударения при различной скорости удара дроби диаметром 1 мм
Fig. 4. The maximum residual stress under the center of the shot imprint, depending

свыше 15 м/с вне зависимости от направления удара (отклонение от нормали к обрабатываемой поверхности до 30 град.) максимальное значение остаточных напряжений в поверхностном слое детали также меняется незначительно.

На рис. 5 представлены графики значений максимальных остаточных напряжений при ударе дроби о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла удара и размера дроби.

Моделирование процесса внедрения стальной дроби диаметром 1 мм при скорости от 15 до 30 м/с позволило сделать вывод о том, что значения остаточных напряжений практически не зависят от угла удара дроби. При этом их величина достаточно высока и практически не отличается от значений остаточных напряжений в тех случаях, когда вектор направления

скорости дроби перпендикулярен обрабатываемой поверхности детали. Применение дроби диаметром 1 мм дает наиболее стабильные значения остаточных напряжений в поверхностном слое, что, в свою очередь, повышает качество обработки. При обработке даже при одном постоянном режиме в любом случае присутствует некоторая часть потока дроби, которая ударяет о поверхность детали под разными углами атаки и с разной скоростью.

На рис. 6 представлены графики величины упрочненного слоя детали при ударе дроби по направлению нормали к поверхности в зависимости от скорости удара и размера дроби.

На рис. 7 представлены графики величины упрочненного слоя детали в зависимости от скорости удара и размера дроби при угле

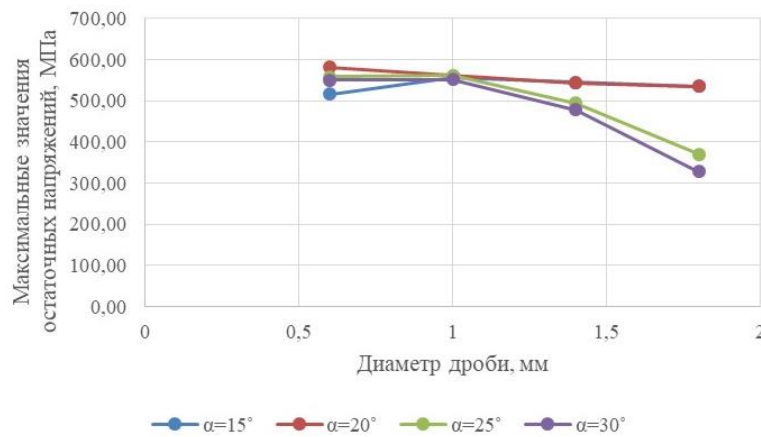


Рис. 5. Максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби при ударе дробью о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла соударения и диаметра дроби
Fig. 5. The maximum values of the residual stress under the center of the shot imprint when the fraction hits the surface at a speed of 30 m/s, depending on the angle of impact and the diameter of the shot

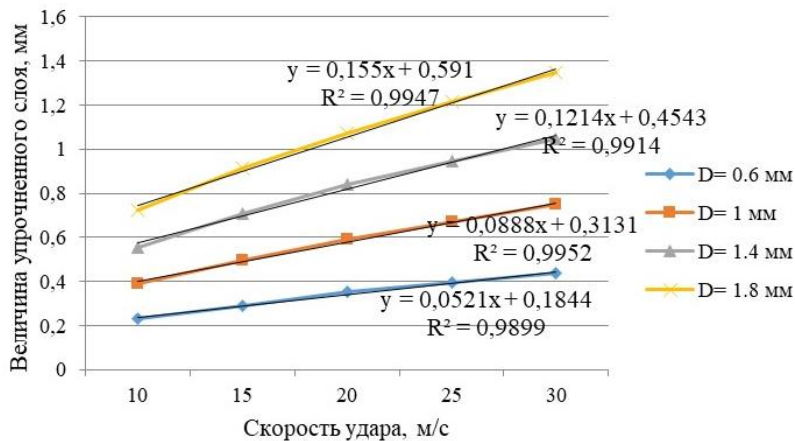


Рис. 6. Зависимости изменения величины упрочненного слоя детали дробью от диаметра и скорости дроби при ее ударе о поверхность под углом 0°
Fig. 6. Dependences of the change in the size of the shot hardened layer of the part on the diameter and velocity of the shot when the shot hits the surface at an angle of 0°

удара дроби 30°.

Анализ величины упрочненного слоя под отпечатком дроби, проведенный в результате моделирования, показал, что для потока дроби, ударяющего о поверхность детали под углом α , не превышающем 20°, величина упрочненного слоя линейно зависит от размера дроби; при $\alpha > 20^\circ$ данная величина зависит от размера дроби и описывается экспонентной кривой. При применении дроби малого размера (диаметром от 0,6 до 1 мм) величина упрочненного слоя принимает стабильное значение и практически не зависит от угла удара дроби. Таким образом, применение дроби малого диаметра при упрочнении приводит к получению более равномерного упрочненного слоя детали. Однако абсолютная

величина упрочненного слоя детали зависит от размера дроби и скорости ее удара, поэтому в зависимости от требований к качеству обработки в каждом конкретном случае необходимо выбрать соответствующие режимы и условия обработки.

Заключение

Разработанная модель удара дроби о поверхность в среде компьютерного моделирования и инженерного анализа Ansys позволяет раскрыть полную картину напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя под отпечатком дроби и определить величину упрочненного слоя при упрочнении деталей.

Для деталей из алюминиевого сплава ВТ95 при упрочнении дробью диаметром более

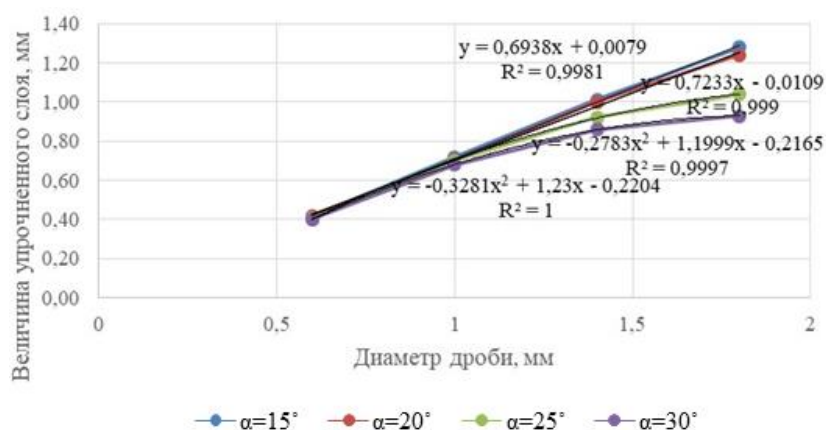


Рис. 7. Величина упрочненного слоя детали, полученная в зависимости от угла атаки дроби α и скорости 30 м/с, при различных диаметрах дроби
Fig. 7. The value of the hardened layer of the part obtained depending on the angle of attack of the shot α and the velocity 30 m/s, for different diameters of the shot

1 мм максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби изменяются незначительно даже при изменении скорости удара и его направления. Однако величина упрочненного слоя детали прямо пропорциональна диаметру и скорости удара дроби.

Полученные зависимости максимальных значений остаточных напряжений в поверх-

ностном слое под отпечатком дроби и величины упрочненного слоя в зависимости от размера дроби, скорости и направления потока дроби позволяют выбрать рациональные условия и режимы дробеударного упрочнения панелей и обшивок крыла самолета из алюминиевого сплава ВТ95 в зависимости от требований к качеству поверхностного слоя деталей.

Список литературы

1. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием / И.Р. Асланян, А.С. Бубнов, В.Н. Емельянов и др. Иркутск : ИрГТУ, 2014. 559 с.
2. Пашков А.Е., Шматков В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства : сб. ст. Иркутск, 1998. С. 62–66.
3. Пашков А.Е. Об особенностях применения Отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 5 (100). С. 17–22.
4. Пашков А.Е., Малащенко А.Ю., Пашков А.А. К вопросу создания цифровых технологий производства крупногабаритных деталей каркаса и обшивки самолета // Технология металлов. 2021. № 1. С. 36–46.
5. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 15. № 1. С. 116–121.
6. Пашков А.А. Моделирование процесса формообразования крупногабаритных деталей двойной кривизны на дробеударных установках контактного типа // Технология металлов. 2020. № 12. С. 19–28.
7. Пашков А.Е., Дияк А.Ю. Определение параметров дробеударного формообразования-упрочнения при помощи CAD/CAM/CAE систем // Управление технологическими процессами машиностроительного производства : сб. ст. Иркутск : Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 62–66.
8. Meguid S.A., G. Shagal, J.C. Stranart, J.Daly. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses // Finite Elements in Analysis and Design. 1999. P. 13. DOI 10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
9. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Is. 1-3. P. 51–63.
10. Miao H. Y. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening / H. Y. Miao, S. Larose, C. Per-ron et al. // Adv. Eng. Softw. 2009. Vol. 40. P. 1023–1038.
11. Zhuo Chen., Yang Fan, Meguid S. A. Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height De-velopment in Shot-Peened Almen Strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. DOI 10.1115/1.4028006.
12. Bhuvaraghan B. Shot peening simulation using discrete and finite element methods / B. Bhuvaraghan, S. M. Srinivasan, O. Prakash et al. // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Is. 12. P. 1266–1276.
13. Касимов Б. М-у., Муминов М.Р., Шин И.Г. Поверхностное упрочнение деталей технологических оборудований и моделирование напряженного состояния при дробеударной обработке // Сб. науч. трудов Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения проф. Н.А. Васильева. Москва, 2021. С. 122–127.
14. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / А.А. Макарук, О.В. Самойленко, Ю.Н. Иванов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2021. Т. 25. № 1(156). С. 8–16.

15. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей / А.А. Макарук, А.А. Пашков, А.М. Хамаганов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 10 (141). С. 29–37.
16. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods // International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 2019. Vol. 632. p. 012100. DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012100.
17. Назаров С.Р., Шодмонкулов З.А. Определение глубины деформационного упрочнения на основе энергетических соотношений дробеударной обработки // Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Витебск, 2021. Т. 2. С. 279–281.
18. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упруго-пластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов : сб. науч. тр. Волгоград, 1977. Вып. 8. С. 58–68.
19. Определение рациональных технологических режимов упрочняющей дробеобработки стальных деталей / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, В.О. Мосейко и др. // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2014. № 9 (136). С. 99–102.
20. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2005. № 3. С. 52–55.
21. Лебеденко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник ДГТУ. 2008. Т. 8. № 4 (39). С. 202–212.
22. Кравченко Г.Н., Кравченко К.Г. Выбор технологических параметров дробеударного упрочнения силовых деталей авиационных конструкций // Полет. 2018. № 12. С. 37–44.
23. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Нгуен Минь Хоанг. Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении // Авиационное строительство и транспорт Сибири : сб. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф. Иркутск, 2020. С. 104–112.

References

1. Aslanyan I.R., Bubnov A.S., Emel'yanov V.N., Isaev A.N., Zaides S.A., Kopylov Yu.R., Kropotkina E.Yu., Lebskii S.L., Matlin M.M., Mozgunova A.I., Popov M.E., Shuster L.Sh. Obrabotka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Processing of parts by surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2014. 559 p.
2. Pashkov A.E., Shmatkov V.S. Osobennosti tekhnologii drobeudarnogo uprochneniya krupnogabaritnykh detalei samoletov [Features of the technology of shot-impact hardening of large-sized aircraft parts]. *Sbornik statei «Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami mashinostroitel'nogo proizvodstva»* [Proceedings «Management of technological processes of machine-building production»]. Irkutsk, 1998, pp. 62–66.
3. Pashkov A.E. Ob osobennostyakh primeneniya Otechestvennoi i zarubezhnoi tekhnologii formoobrazovaniya obshivok i panelei samoletov [On the peculiarities of the application of Domestic and foreign technology of shaping aircraft skin and panels]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5(100), pp. 17–22.
4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Yu., Pashkov A.A. K voprosu sozdaniya tsifrovyyh tekhnologii proizvodstva krupnogabaritnykh detalei karkasa i obshivki samoleta [On the issue of creating digital technologies for the production of large-sized parts of the frame and skin of the aircraft]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2021, no. 1, pp. 36–46.
5. Grebennikov D.S., Maksimenkov V.I. Formoobrazovanie panelei kryla dal'nemagistral'nogo samoleta [Shaping the wing panels of a long-haul aircraft]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2019, vol. 15, no. 1, pp. 116–121.
6. Pashkov A.A. Modelirovanie protsessa formoobrazovaniya krupnogabaritnykh detalei dvoynoi krivizny na drobemetnykh ustanovkakh kontaktного типа [Modeling of the process of forming large-sized parts of double curvature on shot-blasting installations of contact type]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2020, no. 12, pp. 19–28.
7. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. Opredelenie parametrov drobeudarnogo formoobrazovaniya-uprochneniya pri pomoshchi CAD/CAM/CAE sistem [Determination of parameters of shot-impact shaping-hardening using CAD/CAM/CAE systems]. *Sbornik statei «Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami mashinostroitel'nogo proizvodstva»* [Proceedings «Management of technological processes of machine-building production»]. Irkutsk, 1998, pp. 59–62.
8. Meguid S.A., G. Shagal, J.C. Stranart, J.Daly. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1999, P. 13. DOI 10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
9. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2001, vol. 14, issue 1-3, pp. 51–63.
10. Miao H.Y., Larose S., Per-ron C. et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Adv. Eng. Softw.*, 2009, vol. 40, pp. 1023–1038.
11. Zhuo Chen., Yang Fan, Meguid S. A. Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height De-velopment in Shot-Peened Almen Strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014, vol. 136. DOI 10.1115/1.4028006.
12. Bhuvarghan B., Srinivasan S. M., Prakash O. et al. Shot peening simulation using discrete and finite element methods. *Advances in Engineering Software*, 2010, vol. 41, issue 12, pp. 1266–1276.
13. Kasimov B. M. U., Muminov M.R., Shin I.G. Poverkhnostnoe uprochnenie detalei tekhnologicheskikh oborudovaniy i modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya pri drobeudarnoi obrabotke [Surface hardening of technological equipment parts and modeling of the stress state during shot blasting]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora N.A. Vasil'eva* [Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor N.A. Vasiliev]. Moscow, 2021, pp. 122–127.
14. Makaruk A.A., Samoilenko O.V., Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Minaev N.V. Metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov preventivnogo deformirovaniya uprochnyayemykh detalei tipa «stenka» [Method for calculating the technological

parameters of preventive deformation of hardened parts such as wall] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2021, vol. 25, no. 1(156), pp. 8–16.

15. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Khamaganov A.M., Samoilenko O.V. Opredelenie vnutrennikh silovykh faktorov, voznikayushchikh pri uprochnenii podkreplennykh rebami detalei [Determination of internal force factors arising during hardening of parts reinforced with ribs] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 10(141), pp. 29–37.

16. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods. *International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019*. Irkutsk, 2019, vol. 632, P. 012100. DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012100.

17. Nazarov S.R., Shodmonkulov Z.A. Opredelenie glubiny deformatsionnogo uprochneniya na osnove energeticheskikh sootnoshenii drobeudarnoi obrabotki [Determination of the depth of deformation hardening based on the energy ratios of shot-impact treatment]. *Materialy dokladov 54-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii prepodavatelei i studentov (v 2 t.)* [Materials of reports of the 54th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students (In 2 vol.)]. Vitebsk, 2021, vol. 2, pp. 279–281.

18. Drozd M.S., Osipenko A.P. Analiticheskoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya pri vnedrenii uprugoi sfery v uprugo-plasticheskoe poluprostranstvo [Analytical study of the stress state during the introduction of an elastic sphere into an elastic-plastic half-space]. *Sbornik nauchnykh trudov «Metallovedenie i prochnost' metallov»* [Proceedings «Metallography and strength of metals»]. Volgograd, 1977, no. 8, pp. 58–68.

19. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Moseiko V.O., Moseiko V.V., Lebskii S.L. Opredelenie ratsional'nykh tekhnologicheskikh rezhimov uprochnyayushchei drobeobrabotki stal'nykh detalei [Determination of rational technological modes of reinforcing shot processing of steel parts]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Volgograd State Technical University], 2014, no. 9(136), pp. 99–102.

20. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskii S.L. Prognozirovaniye parametrov uprochneniya detalei mashin putem poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Prediction of parameters of hardening of machine parts by surface plastic deformation]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Volgograd State Technical University], 2005, no. 3, pp. 52–55.

21. Lebedenko V.G. Matematicheskoe modelirovaniye protsessa formirovaniya geometricheskikh parametrov poverkhnostnogo sloya i parametrov uprochneniya pri obrabotke detalei drobi [Mathematical modeling of the formation of geometric parameters of the surface layer and hardening parameters during the processing of shot parts]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2008, vol. 8, no. 4(39), pp. 202–212.

22. Kravchenko G.N., Kravchenko K.G. Vybory tekhnologicheskikh parametrov drobeudarnogo uprochneniya silovykh detalei aviatsionnykh konstruksii [The choice of technological parameters of shot-impact hardening of power parts of aircraft structures]. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal], 2018, no. 12, pp. 37–44.

23. Le Chi Vinh, Koltsov V.P., Nguyen Minh Hoang. Modelirovaniye formirovaniya osnovnykh parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya pri drobeudarnom uprochnenii [Modeling of the formation of the main parameters of the quality of the surface layer during shot-impact hardening]. *Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aviamashinostroeniye i transport Sibiri»* [Proceedings of XIV International Scientific and Technical Conference «Aircraft engineering and transport of Siberia»]. Irkutsk, 2020, pp. 104–112.

Информация об авторах

Кольцов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: kolcov@ex.istu.edu.

Ле Чи Винь, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: vinh_istu@mail.ru.

Стародубцева Дарья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

Нгуен Минь Хоанг, магистрант кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

Information about the authors

Vladimir P. Koltsov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: kolcov@ex.istu.edu.

Le Chi Vinh, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: vinh_istu@mail.ru.

Dar'ya A. Starodubtseva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

Nguyen Minh Hoang, Master's Student of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.